



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

원자 조작과 비탄성 전자 터널링 분광법을 위한 Besocke 방식 주사터널링현미경 제작

Construction of Besocke type STM for manipulation and
IETS

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

물리천문학부

강 민

이학석사학위논문

원자 조작과 비탄성 전자 터널링 분광법을 위한 Besocke 방식 주사터널링현미경 제작

Construction of Besocke type STM for manipulation and
IETS

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

물리천문학부

강 민

원자 조작과 비탄성 전자 터널링
분광법을 위한 Besocke 방식
주사터널링현미경 제작

Construction of Besocke type STM for manipulation
and IETS

지도교수 국 양

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함
2012 년 12 월

서울대학교 대학원
물리천문학부
강 민

강 민의 이학석사 학위논문을 인준함
2012 년 12 월

위 원 장 이 진 호 (인)

부위원장 국 양 (인)

위 원 이 탁 희 (인)

요약

STM은 Scanning Tunneling Microscope의 약자로 전자 터널링 효과를 이용한 주사 현미경이다. STM의 기본 기법에는 토포그래피, 분광법, 원자조작이 있다. 토포그래피는 가장 기본이 되는 기법이지만 분광법 중 비탄성 전자 터널링 분광법과 원자 조작은 저온 동작이 가능하고 굉장히 안정적인 STM이 필요하다. 이러한 실험을 위해 Besocke type STM을 설계하고 제작하였다. 연속 흐름 냉동기를 사용하고 STM head의 열용량을 최소화해서 저온에서 안정화되는 시간이 굉장히 짧고 9개의 *in-situ* dosing이 가능한 포트를 가진 것이 장점이다. 셋업이 완전히 마무리되지 않아서 IETS와 원자 조작 실험을 하지는 못했지만, 상온 동작과 저온 동작에서 굉장히 안정적인 이미지를 얻을 수 있었다.

주요어: 주사터널링분광법, 비탄성전자터널링분광법

학번: 2011-20386

목차

요약	i
Chapter 1 서론	1
1.1 주사 터널링 현미경	2
1.2 STM을 이용한 원자 조작	4
1.3 비탄성 전자 터널링 분광법(IETS)	5
Chapter 2 Besocke Type STM	10
2.1 개관	10
2.2 설계 고려사항	11
2.2.1 Main Chamber	11
2.2.2 STM head	17
2.2.3 Evaporator for <i>in-situ</i> dosing	19
2.2.4 Continuous flow Cryostat	23
2.2.5 Wobble stick modification	23
Chapter 3 실험	25
3.1 준비 과정	25
3.2 결과	25
Abstract	31
감사의 글	32

그림 목차

Figure 1.1	One-dimensional metal-vacuum-metal tunneling junction	3
Figure 1.2	STM Manipulation	5
Figure 1.3	Quantum corral	6
Figure 1.4	Manipulated artifitial structure.	7
Figure 1.5	Inelastic tunneling	8
Figure 2.1	STM2 Main Chamber	12
Figure 2.2	Sample heater	13
Figure 2.3	Tip heater	14
Figure 2.4	Heater assembly	14
Figure 2.5	Sample heater insulations	15
Figure 2.6	Carousel	15
Figure 2.7	Shield assembly	16
Figure 2.8	Besocke type head	18
Figure 2.9	Metal evaporator insulations	20
Figure 2.10	Evaporator for metal dosing	21
Figure 2.11	ARS Cryo helitran LT3B	22
Figure 2.12	Wobble stick modification	24
Figure 3.1	Au(111) surface Herringbone structure	26
Figure 3.2	Low current topography	27
Figure 3.3	Atomic resolution image	28

Chapter 1 서론

Scanning tunneling microscope(STM)는 주사 터널링 현미경으로 양자역학의 터널링 효과를 이용해 표면에 대한 정보를 연구할 수 있는 기기이다. STM의 주된 기법은 Topography, Spectroscopy, Manipulation이 있다. Topography를 얻는 방법은 다음과 같다. Probe tip을 coarse positioner를 이용하여 sample로부터 수Å이내로 접근시키고 fine z feedback을 이용해 팁-샘플 거리를 적정 수준으로 유지한다. 이때 팁과 샘플 사이에 bias 전압을 인가하면 전자 터널링에 의해 한 점의 터널링 전류를 측정할 수 있다. 이 상태에서 x-y piezo electric drive를 이용해 위치를 바꿔 가며 전류를 측정하면 2차원 평면의 current map을 얻을 수 있다. Topography를 하는 방법은 두 가지가 있는데 하나는 전류를 일정하게 유지하도록 z feedback을 걸어 팁의 위치를 측정하는 방법이 있고 다른 하나는 일정한 높이에서 전류를 측정하는 방법이 있다. 보통 전류를 유지한 채 표면의 모양을 따라 팁을 움직여 tip piezo에 걸어준 전압을 기록하는 방법으로 표면의 topography를 얻을 수 있다. Spectroscopy는 bias 전압에 따라 전류를 기록하는 방법이다. 이를 이용해 $\frac{dI}{dV}$ 를 얻으면 표면의 Local Density of States(LDOS)를 얻을 수 있다. Spectroscopy중 어려운 기법으로 Inelastic Electron Tunneling Spectroscopy(IETS)가 있는데 이를 이용하면 molecule vibration, phonon 또는 spin excitation등의 미세한 차이를 측정할 수 있다. 마지막으로 Manipulation은 단원자나 분자 등을 하나씩 움직여 artificial structure를 만들 수 있는 기법이다. 이러한 기법들을 활용하면 표면의 특성에 대해 연구할 수 있다.

1.1 주사 터널링 현미경

터널링은 고전적인 방법으로 설명할 수 없는 양자역학의 효과 중 하나로 어떤 입자의 에너지보다 큰 장벽이 있을 때 이 장벽을 뛰어넘을 확률이 존재하는 것이다. 학부 양자역학 시간에 배웠던 1 dimension modeling으로도 간단한 개념을 설명할 수 있다. 고전역학에서 에너지 E 를 가진 전자가 potential $U(z)$ 에서 움직일 때 다음과 같은 운동방정식이 성립한다.[4]

$$\frac{p_z^2}{2m} + U(z) = E, \quad (1.1)$$

여기서 m 은 전자의 질량, p_z 는 전자의 z 방향 운동량이다. 고전역학에서는 $E < U(z)$ 의 영역에서 p_z 가 정의되지 않는다. 즉 $E < U(z)$ 인 영역에서 전자는 발견할 수 없다. 하지만 양자역학에서는 wavefunction을 이용해 다음과 같이 나타낸다.

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2}{dz^2} \psi(z) + U(z)\psi(z) = E\psi(z). \quad (1.2)$$

계산의 편의를 위해 포텐셜 $U(z)$ 를 다음과 같이 두면 이 식은 $E > U(z)$ 에서 다음과 같은 해를 갖는다.

$$\psi(z) = \psi(0)e^{\pm ikz}, \quad (1.3)$$

where

$$k = \frac{\sqrt{2m(E - U)}}{\hbar}. \quad (1.4)$$

이 해는 $p_z = \hbar k$ 의 운동량을 가지고 양 방향으로 움직이는 전자를 뜻한다. 또한 $E < U(z)$ 에서

$$\psi(z) = \psi(0)e^{-\kappa z}, \quad (1.5)$$

where

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(U - E)}}{\hbar}. \quad (1.6)$$

가 된다. 이는 z 방향으로 decay 하는 해 이다. 즉 전자는 classical forbidden area 를 통과할 수 있다. 이 기본 모델을 가지고 STM에 적용해 보자. 그림 1.1 과

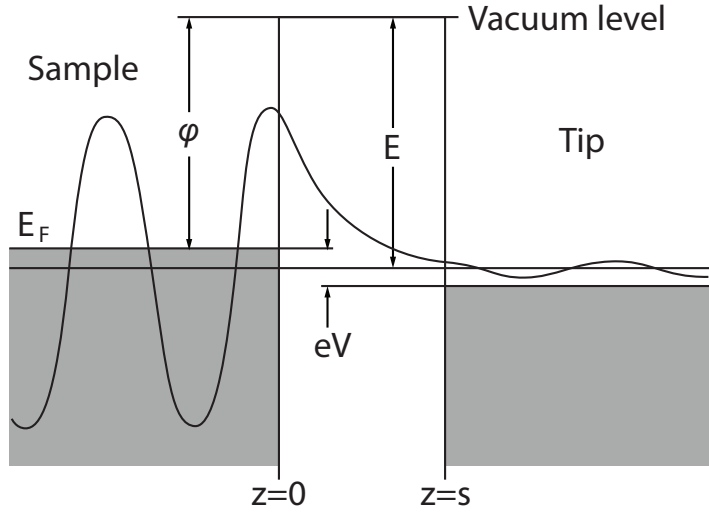


그림 1.1: **One-dimensional metal-vacuum-metal tunneling junction** - 왼쪽은 샘플 오른쪽은 팁이다. 둘 다 semi-infinite free electron metal로 가정. (Re-produced from Chen, 2008.)

같이 팁과 샘플 사이에 V 만큼의 bias 전압을 걸어주면 $E_F - eV$ 와 E_F 사이에 있는 energy level E_n 을 갖는 sample state ψ_n 는 팁 방향으로 터널링을 하게 된다. 팁과 샘플은 둘 다 같은 일함수 ψ 를 갖고 bias voltage $V \ll \psi$ 라 가정하였다. n th sample state에 있는 전자가 tip surface $z = s$ 에서 발견될 확률 w 는

식 (1.5), (1.6)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$w \propto |\psi_n(0)|^2 e^{-2\kappa s}, \quad (1.7a)$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m\psi}}{\hbar}. \quad (1.7b)$$

$E_F - eV$ 와 E_F 사이에 있는 모든 state에 대해 더하면 터널링 전류는 다음과 같다.

$$I \propto \sum_{E_n=E_F-eV}^{E_F} |\psi_n(0)|^2 e^{-2\kappa s}. \quad (1.8)$$

Bias voltage V 가 충분히 작으면 이 식은 LDOS 로 표현할 수 있다. z 에서의 에너지 E 를 갖는 LDOS $\rho_S(z, E)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_S(z, E) \equiv \frac{1}{\epsilon} \sum_{E_n=E-\epsilon}^E |\psi_n(z)|^2. \quad (1.9)$$

식 1.8에 식 1.9를 대입하면 tunneling current를 sample의 LDOS로 나타낼 수 있다.

$$I \propto V \rho_S(0, E) e^{-2\kappa s} \quad (1.10)$$

즉 bias voltage를 바꿔가며 spectroscopy를 하면 샘플의 LDOS를 알 수 있다.

1.2 STM을 이용한 원자 조작

STM manipulation 이란 표면 위의 단일 원자 혹은 분자의 위치를 이동시키는 방법이다. 크게 두가지 방법이 있는데 원자가 표면에서 옆으로만 움직이는 Lateral Manipulation(LM)과 xlyz로 원자를 잡아 올려서 원하는 위치에 내려 놓는 Vertical Manipulation(VM)이 있다. Atomic manipulation은 1990년 D.M. Eigler 와 E.K. Schweizer가 Ni(110)위의 Xe atom으로 IBM회사 로고를 새긴 것이 처음이다.[5] LM은 pushing, pulling, 그리고 sliding 모드가 있다. Pulling

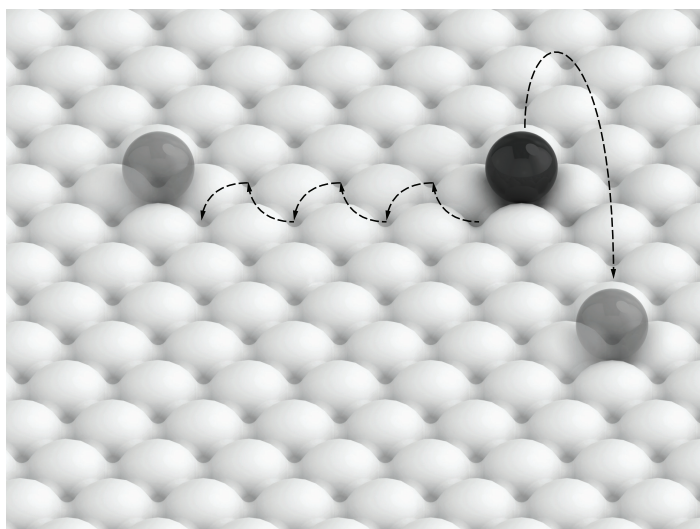


그림 1.2: **STM Manipulation** - Lateral manipulation and vertical manipulation

의 경우 topography를 하는 전류보다 1000배 가량 더 높은 전류가 읽히도록 특정 원자 위로 팁을 이동시킨 뒤 팁을 원하는 방향으로 이동하면 팁과 원자간의 인력에 의해 원자가 옆으로 움직이게 된다. 이러한 이동을 할 때 feedback에 의해 원자의 높이를 따라 아래로 움직인다 원자가 옮겨지면 다시 원자위로 옮겨지게 된다. Pushing의 경우 인력이 아니라 척력을 이용한 과정이다. Sliding의 경우는 원자를 팁의 potential barrier 에 가둔 채로 움직이는 방법이다. VM은 bias 전압을 이용해 팁쪽의 포텐셜이 더 낮춰 샘플 표면의 원자를 팁에 붙힌 뒤 원하는 위치에서 bias 극성을 바꾸어 팁에서 표면으로 다시 이동시키는 방법이다.

1.3 비탄성 전자 터널링 분광법(IETS)

1.1절 에서 설명한 tunneling scheme은 energy가 보존되는 elastic tunneling에 대한 내용이다. Inelastic tunneling의 경우 molecular vibration등에 의해 energy손실이 일어나는 터널링이다. 그림 1.5a를 보면 Pauli exclusion principle

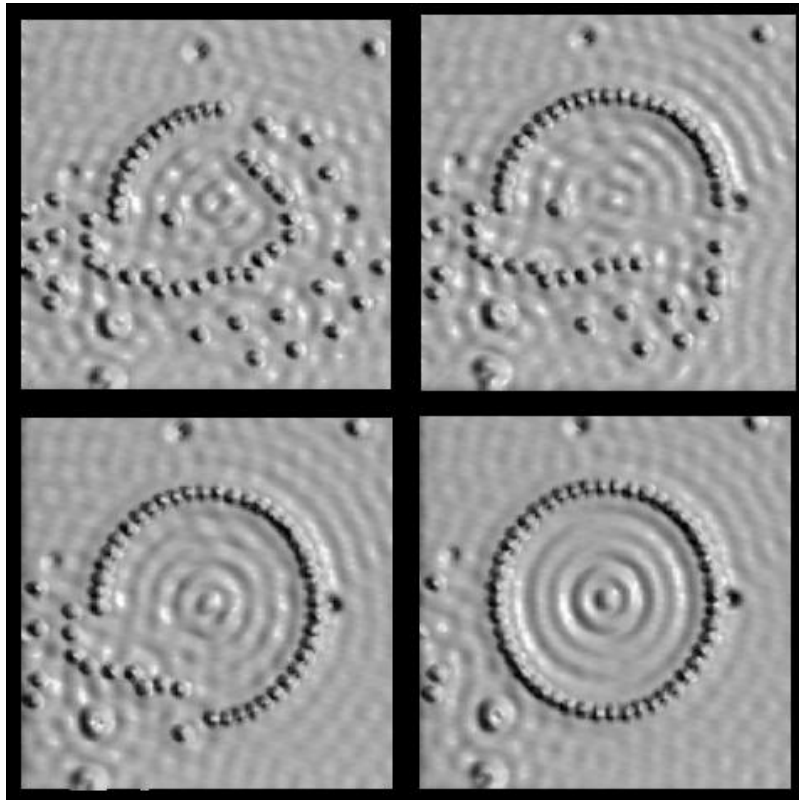


그림 1.3: Quantum corral - 48 atom Fe ring on the Cu(111) surface.
(M.F.Crommie,1993)

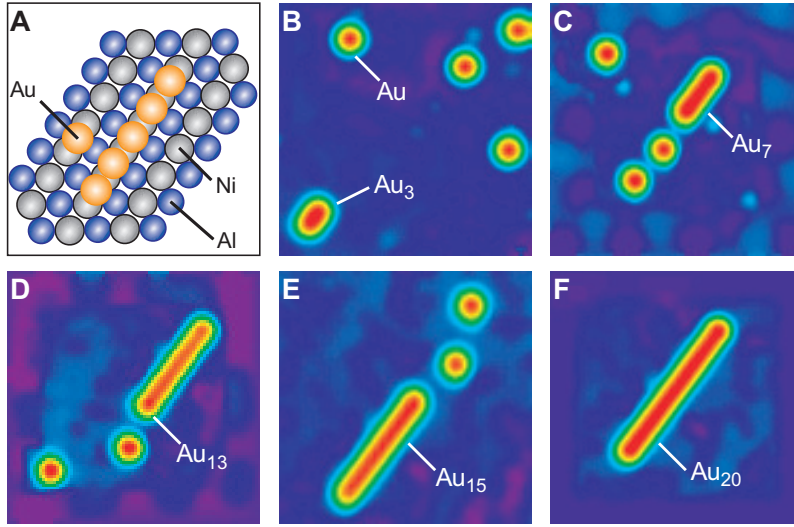


그림 1.4: Manipulated artificial structure. - Au chain on NiAl(110) surface. (N. Nilus, 2002)

에 의해 inelastic tunneling은 $eV > h\nu$ 의 영역에서만 일어난다. 이러한 이유로 그림 1.5b를 보면 $V = \frac{h\nu}{e}$ 부터 inelastic tunneling channel이 생겨 conductance가 증가하므로 $\frac{d^2I}{dV^2}$ 그래프에서 vibration mode가 peak으로 나타난다. peak의 성질은 위치와 넓이 그리고 크기가 있다. 우선 위치는 앞에서 말한 원리로 설명된다. 넓이는 세가지 원인에 의해 달라진다. natural width Γ 에 의한 영향과 온도에 의해 broadening 되는 효과, 그리고 voltage modulation을 사용한 측정 방법에 따른 효과이다. 크기는 tunneling electron과 가능한 mode들간의 interaction mechanism에 따라 다르기 때문에 계산이 어렵다. [7] IETS는 Raman이나 IR spectroscopy에 비해 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 아주 적은 양의 시료로도 실험이 가능하다.
- overtone이나 combination band가 굉장히 약하게 나온다.
- 광학적으로 측정 불가능한 경우도 측정할 수 있다.

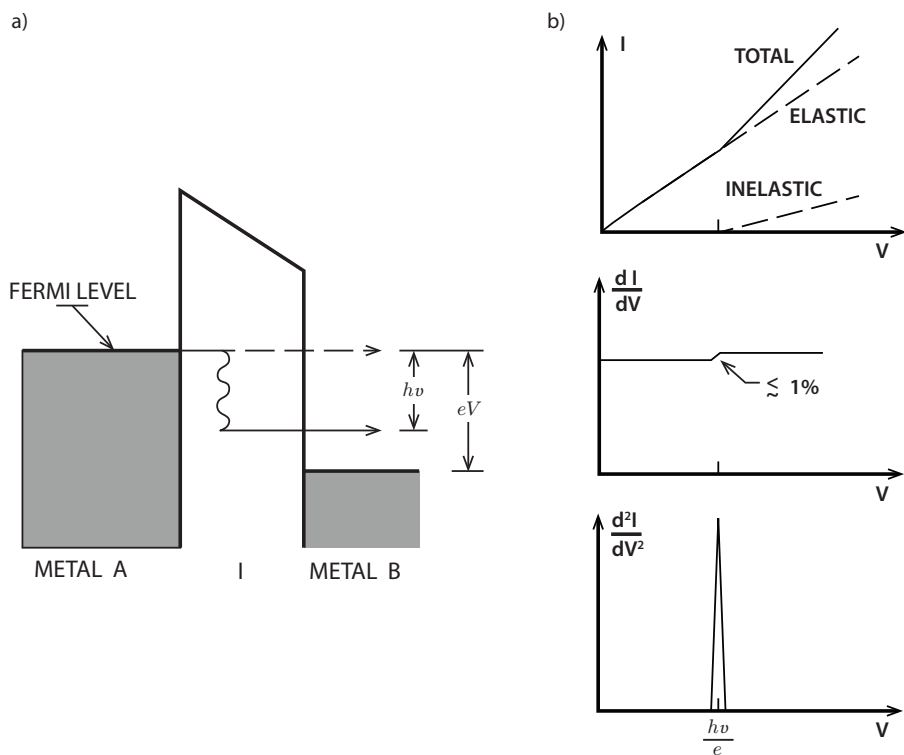


그림 1.5: Inelastic tunneling - $eV < h\nu$ 의 경우 이미 전자가 채워져 있기 때문에 inelastic tunneling이 일어나지 않는다. (Hansma 1977)

IETS로 나오는 신호는 굉장히 작기 때문에 저온에서 터널링 전류가 굉장히 안정적인 STM이 필요하다.

Chapter 2 Besocke Type STM

2.1 개관

STM은 Gerd Binnig와 Heinrich Rohrer가 처음 선보인 이래로(1982,1987) 여러 가지 형태가 발명되었다.[2] STM의 기본 구성은 sample, probe tip, piezo electric drive, coarse positioner, vibration isolation system, electronics system 으로 이루어진다. 또한 electronics 는 digital feedback을 위한 ADC, DAC, tip current amplifier, coarse positioner driver로 이루어져 있다.[4] 또한 활용 방법에 따라 상온 상압에서 실험할 수도 있고 ultra high vacuum(UHV)에서 실험할 수도 있고 극저온 실험도 가능하며 심지어는 물이나 다른 액체 내에서 실험할 수도 있다. 경우에 따라 진공을 잡기 위해서는 UHV chamber가 필요하고 저온 실험을 위해서는 cryostat이 필요하다.

다양한 형태의 STM이 있지만 물리학에서 쓰이는 STM은 생각을 하는 방식의 차이와 샘플과 팁을 접근시키는 방식의 차이로 분류할 수 있다. 냉각기가 하단에 존재하는 Top loading cryostat과 상단에 존재하는 Bottom loading cryostat이 있고 Approaching 방식의 차이로는 Pen-type과 Besocke-type이 있다. Bottom loading은 주로 dewar안으로 STM head를 집어 넣는 방법이기 때문에 top loading에 비해 head accessibility가 떨어진다. Pen-type은 여러 장의 piezo sheet stack 이 순차적으로 움직이며 hexagonal shaped walker 를 밀어 올려 approaching 을 하는 방식이다. Besocke-type은 1987년 K. Besocke 에 의해 제안되었으며 3개의 piezoelectric tube 위에 sample holder를 올려놓고 3개의 piezo를 이용해 approaching을 하는 방식이다.[1][6] Besocke type STM이 pen type STM에 비해 scanner head 가 작고 sample주변 공간이 많다. Scanner head

가 작으면 Thermal mass가 작아져 4K 이하의 극저온 실험을 할 때 냉각시간도 줄어들고 안정화도 빠르게 된다. 샘플 주변의 공간이 많으면 tip-sample junction 부분의 accessibility가 좋아지므로 *in-situ* dosing이나 광학 실험 설계가 편리해짐을 뜻한다. Pen-type STM의 경우 scan시에 팁과 샘플을 모두 고정시킬 수 있지만 Besocke-type은 그럴 수 없다. 그래서 외부 진동이나 충격에 의해 sample holder가 움직일 수 있다.

이 논문에서 다룬 STM은 bottom loading continuous flow cryostat을 사용한 Besocke-type STM으로 University of California, Irvine 의 Wilson Ho가 정립한 디자인을 바탕으로 되어있다. Besocke-type STM의 장점을 살려 많은 개수의 *In-situ* dosing port 를 장착함으로서 molecule 실험을 용이하게 디자인 하였다.

2.2 설계 고려사항

2.2.1 Main Chamber

그림 2.1은 scanner가 들어갈 UHV chamber이다. Sample preparation과 scanning을 한 챔버 내에서 할 수 있다. 앞쪽의 wobble stick port는 wobble stick 이 들어갈 수 있는 2.75인치 포트이다. 끝부분은 2.75인치 포트이지만 6.5인치 외경의 포트로 wobble stick 을 21도까지 움직일 수 있다. 또한 bellows 보호를 위해 내부에 chamfering이 되어있다. Main window port는 챔버 내부를 모두 볼 수 있도록 wobble stick 바로 위에 놓여 있으며 8인치의 큰 뷰포트를 사용했다. 이로 인해 챔버 내부의 STM head와 heaters, 그리고 carousel을 모두 볼 수 있어 편리하다. Heater port와 carousel port는 대칭을 이루는 2개의 6인치 포트이다. 각각 heater와 carousel을 고정하는 역할을 하며 서로 역할을 바꿀 수 있어 챔버 위치에 따라 대칭 활용이 가능하다. 또한 챔버 위쪽으로 히터 중앙을 바라보는 3개의 2.75인치 포트가 있는데 이는 각각 ion-gun 과 pyrometer 등을 장착하여 sample heater를 통해 sample preparation을 할 수 있으며 나머

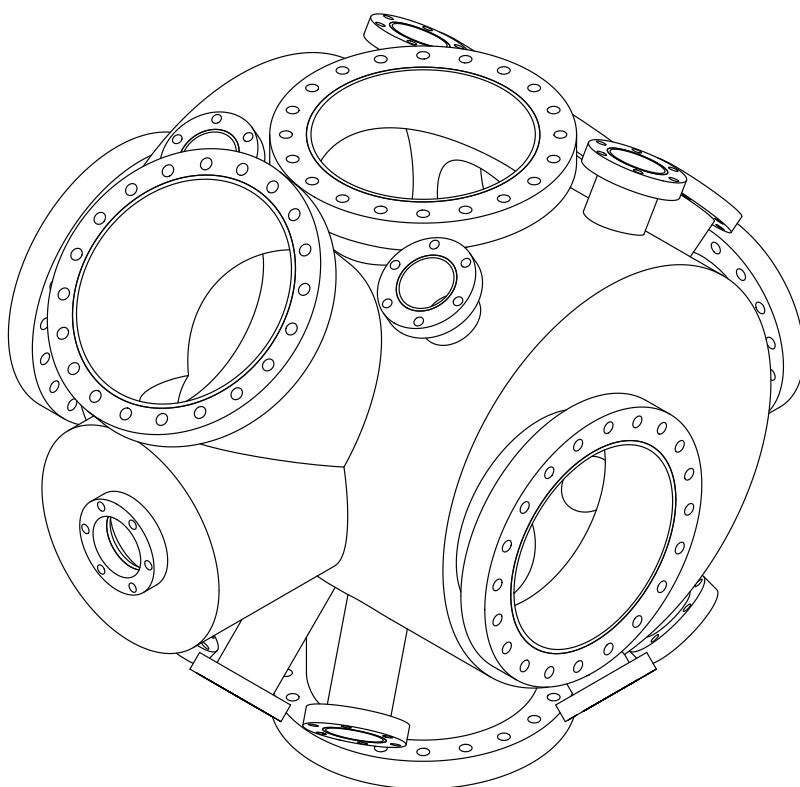


그림 2.1: STM2 Main Chamber - 샘플을 향한 2.75인치 *in-situ* dosing 포트 9개가 가장 큰 특징이다.

지는 상온 이상에서 dosing을 하는 포트도 사용할 수도 있다. 대칭설계로 인해 남는 carousel쪽의 상단 포트는 RGA등 필요시 서비스 포트도 사용 가능하다. 또한 이 챔버의 가장 큰 특징은 하단 9개의 *in-situ* dosing port이다. Scanner 내의 sample을 직접 향하는 포트이기 때문에 여러 molecule의 low temperature *in-situ* dosing이 가능하며 대칭형 디자인으로 photon 실험도 가능하도록 되어 있다.

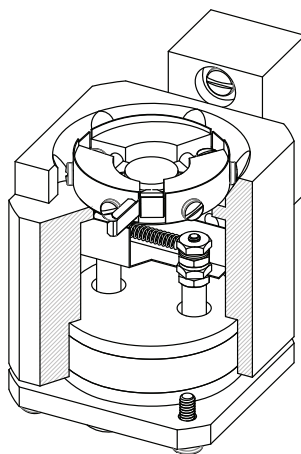


그림 2.2: **Sample heater** - Sample holder를 그대로 올려놓을 수 있는 구조. 끼워넣기가 아니라 올려넣기 구조기 때문에 판스프링이 없으므로 안정적이다.

그림 2.2는 sample heater이다. Sample 아래 필라멘트를 감싸고 있는 구조가 repeller다. Repeller는 한쪽 필라멘트의 ground와 연결되어 있어 heater body를 양극으로 가속시키면 열전자를 sample쪽으로만 가속되도록 도와 e-beam heating의 효율을 높여준다.

그림 2.5는 Sample heater body를 chamber 벽면과 연결하는 구조이다. Sample heater는 e-beam heating을 할 때 고전압이 걸리게 되므로 chamber 내벽과 전기적으로 절연시켜야 한다. 고전압을 걸어주므로 단순히 alumina part 만 이용해서 절연하는 경우 alumina 표면에서 evaporated metal이 증착 되어 leakage

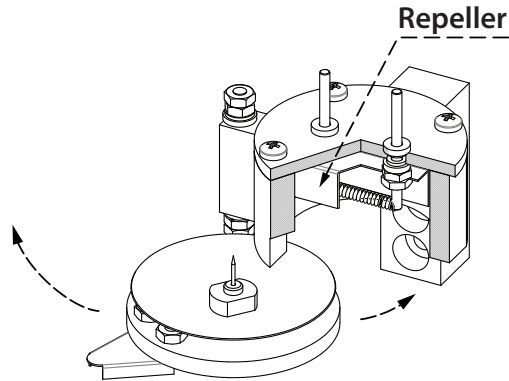


그림 2.3: **Tip heater** - Tray에 팁을 올려놓은 후 돌려 넣어 히팅을 할 수 있는 디자인이다. Sample heater와 마찬가지로 끼워넣는 구조가 없다. 필라멘트를 감싸고 있는 repeller는 열전자가 효율적으로 가속되도록 돕는다.

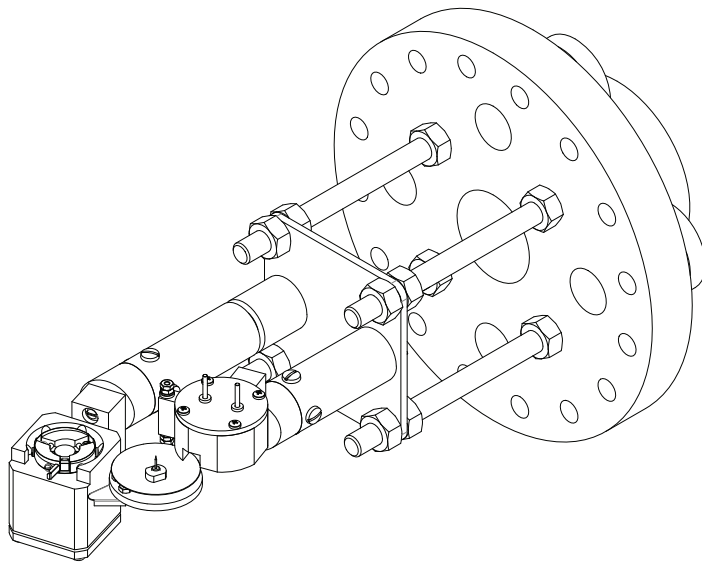


그림 2.4: **Heater assembly** - Heater port에 들어갈 heater 구조이다. Sample heater와 Tip heater가 나란히 있다. 구조적 안정성과 경량화를 위해 4개의 M8 thread로 연결했다. 두 heater는 모두 wobble stick 방향으로 약간 틀어져 있다.

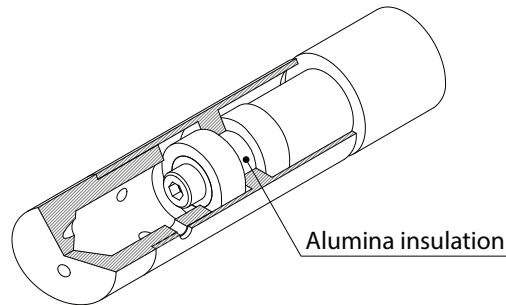


그림 2.5: Sample heater insulations - 절단된 부분이 heater쪽이고 뒷부분이 chamber 벽면에 붙는 쪽이다. 이 둘 사이는 alumina insulation으로 떨어져 있다.

가 발생할 수 있다. 이를 막기 위해 와 같이 두 metal body를 vacuum gap으로 처리하고 이 gap을 이용해 alumina part를 가린다.

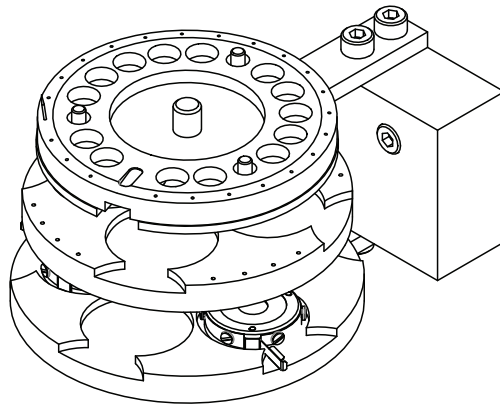


그림 2.6: Carousel - Tip과 Sample을 보관할 수 있는 공간이다.

그림 2.6은 carousel으로 팁과 샘플을 저장할 수 있는 공간이다. Carousel이 있어야 단일 챔버 내에서 여러 샘플과 팁 교체를 할 수 있다. 또한 가장 위의 tip plate는 쉽게 교체할 수 있는 디자인으로 챔버의 진공을 유지한 채 옆에서 팁과 샘플을 한꺼번에 교환을 할 수 있도록 디자인 되어 있다. 너무 쉽게 돌아가지 않도록 나사봉에 각 층을 고정시키고 나사봉 양쪽을 spring washer를 이용해 텐션을 준다. 또한 모든 층이 같이 돌아가므로 사용하기 편하다.

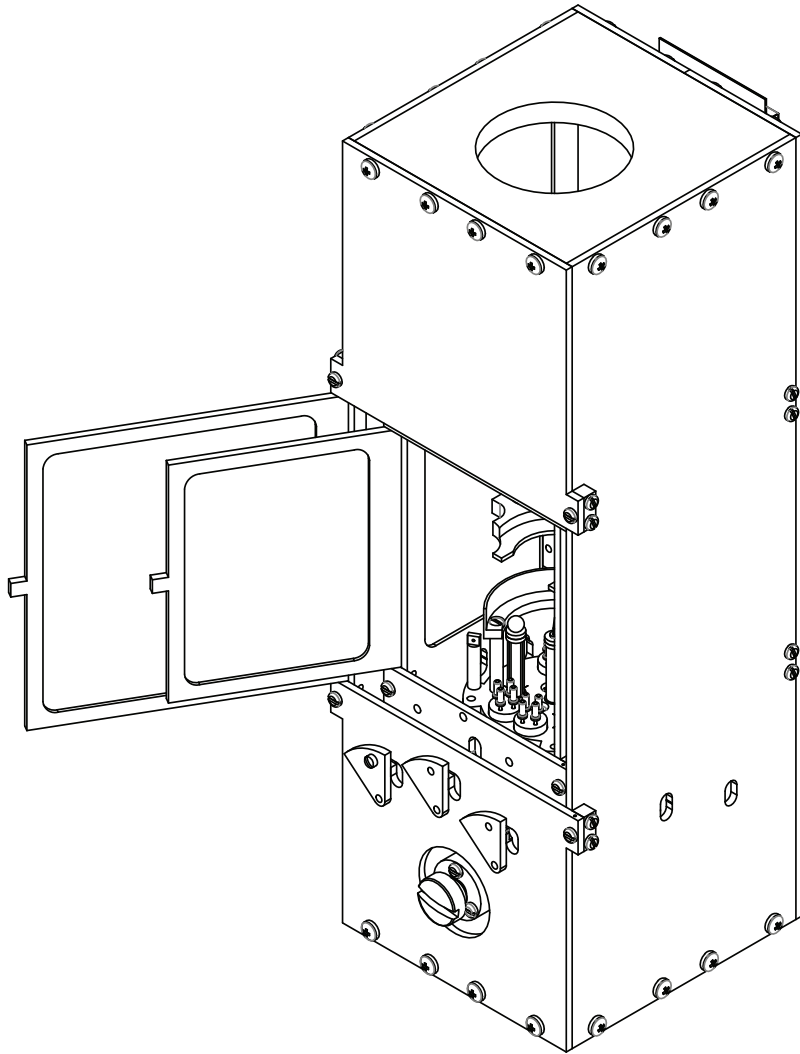


그림 2.7: Shield assembly - Inner shield 와 outer shield

그림 2.7은 저온에서 radiation에 의한 온도 상승을 막아주는 shield이다. Inner shield와 outer shield의 2중 구조로 되어 있다. Outer shield는 head를 외부의 radiation으로부터 보호하는 바깥쪽 실드이다. 재질은 OFHC이고 뒷면에 signal line 및 기타 wire가 지나갈 수 있는 wall이 존재한다. 열용량을 최소화 하기 위해 몇몇 내부 벽면이 얇게 디자인 되어 있다. 전면의 문을 열어서 inner shield 및 샘플과 팁에 접근할 수 있다. *in-situ* dosing을 위한 9개의 dosing hole 이 있다. 이 hole 들은 각각 셔터로 열고 닫을 수 있도록 디자인 되어있다.

Inner shield는 outer shield 내부의 2차 실드이며 가장 저온으로 내려가는 부분이다. 재질은 OFHC이고 뒷면에 inner shield 바깥으로 나갈 수 있는 Sapphire window feedthrough가 있다. 마찬가지로 열용량을 최소화 하기 위해 몇몇 내부 벽면이 얇게 디자인 되어 있다. 기본 디자인보다 가로 세로가 1/16인치 만큼 작다. 이는 좀 더 나은 damping performance 와 dosing hole shutter를 위한 공간을 제공하고, outer shield와의 거리를 뒤서 저온에서 radiation에 의한 영향을 조금 덜 받을것이라 기대한다. 전면의 문을 열어서 샘플과 팁에 접근할 수 있다.

2.2.2 STM head

그림 2.8은 scanner 파트이다. Molybdenum 재질의 base plate위에 3개의 tube piezoelectrode가 tungsten ball을 이용해 3 point kinematic contact를 이루며 molybdenum 재질의 샘플 홀더를 지지하는 구조다. 같은 재질의 샘플홀더와 base plate이기 때문에 radial 방향으로 thermally compensable하며 팁과 샘플을 지지하는 piezo tube도 같은 크기이기 때문에 z방향으로도 thermally compensable 하다. 이 3개의 tube piezoelectrode는 샘플 홀더의 경사를 이용한 approaching과 자체적인 움직임을 통한 xy motion을 담당한다. xy piezo 주변의 guard rail은 샘플을 올려두거나 approaching을 하는 도중 샘플이 떨어지는 사고를 방지한다. 중앙의 tube piezo는 tip을 고정하며 fine z motion을 담당한다.

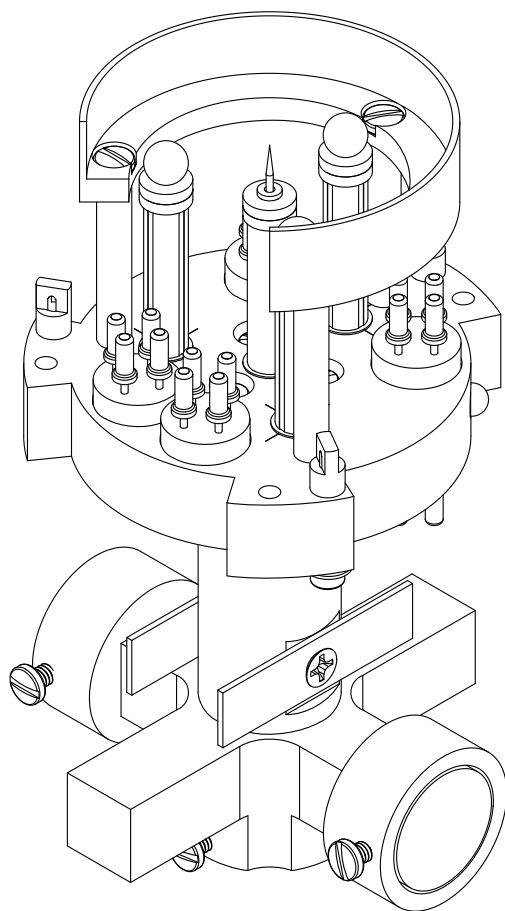


그림 2.8: Besocke type head - 3개의 tube piezo가 Sample holder를 지지하는 구조로 되어있다.

모든 tube piezo는 alumina에 비해 전류 누설의 위험이 적은 sapphire재질의 washer로 절연되어 있다. 모든 전극은 sapphire standoff 에 연결되어 있으며 여기서 tip socket을 통해 외부와 연결되어 있다. *in-situ* dosing을 하면 head 주변에 여러 원자 및 분자들이 붙기 때문에 이러한 절연 디자인이 중요하다. Base plate 밑으로는 OFHC재질의 cross piece가 있다. cross piece에는 3개의 SmCo 자석이 달려있는데 이는 inner shield와 eddy current를 이용한 damping motion을 담당한다. Baseplate와 cross piece에는 3mil 5N copper wire로 inner shield와 thermal connection이 있다. Scanner는 homemade inconel X750 spring을 통해 inner shield에 연결되어 magnetic eddy current damper와 함께 외부 진동을 차단한다.

2.2.3 Evaporator for *in-situ* dosing

실험에 필요한 evaporator는 1500°C 이하에서 사용하므로 알루미늄 도가니를 사용해 디자인했다. 0.5mm tungsten wire를 도가니에 단단히 고정하기 위해 도가니 표면에 나사산을 내어 필라멘트를 감아준다.[3] 고온의 도가니가 챔버 벽면을 손상하지 않도록 shield를 이용해 냉각해야 한다. 두가지 디자인을 만들었는데 하나는 상대적으로 고온에서 metal dosing에 사용할 water jacket 디자인이고 다른 하나는 molecule dosing에 사용할 stainless sheet shield 디자인이다. Metal evaporator 는 water jacket 때문에 공간이 매우 협소하므로 전극을 alumina tube를 이용해 water jacket과 절연시킨다. 가장 앞쪽엔 shutter를 degassing 도중에 dosing이 되는 것을 막아준다. Rotational feedthrough와 셔터는 flexible shaft를 이용해 연결되어 있기 때문에 위치를 자유롭게 바꿀 수 있다.

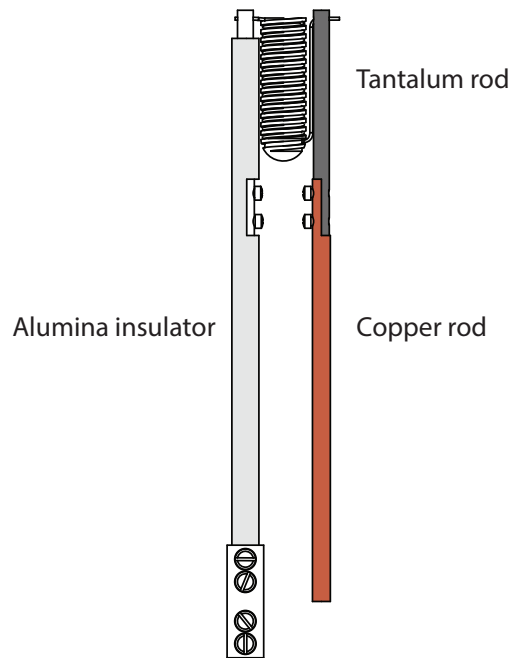


그림 2.9: Metal evaporator insulations - 필라멘트 부분이 고온으로 올라가기 때문에 copper rod 끝에 tantalum rod로 연결하고 여기에 tungsten filament가 연결된다. 또한 alumina tube insulator를 사용해 water jacket 벽면과 절연한다.

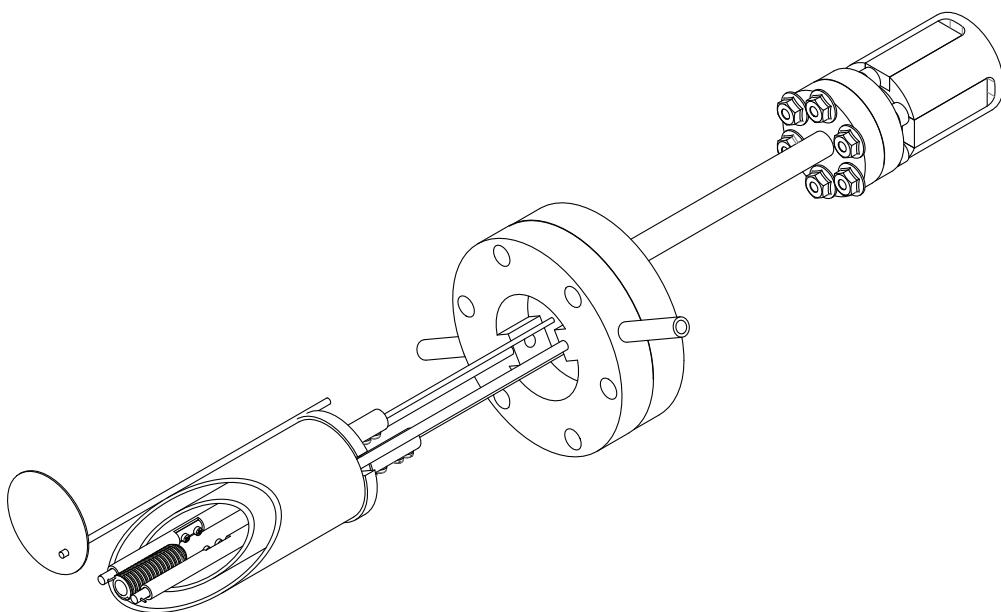


그림 2.10: Evaporator for metal dosing - 1000도 이상의 고온에 사용할 수 있는 evaporator 디자인이다. 구조를 보기 편하게 water jacket는 잘라내었다. 뒤에 달려있는 CF1.33 파트는 rotation feedthrough로 flexible shaft(도면에 없음)를 사용해 shutter를 여닫을 수 있다.

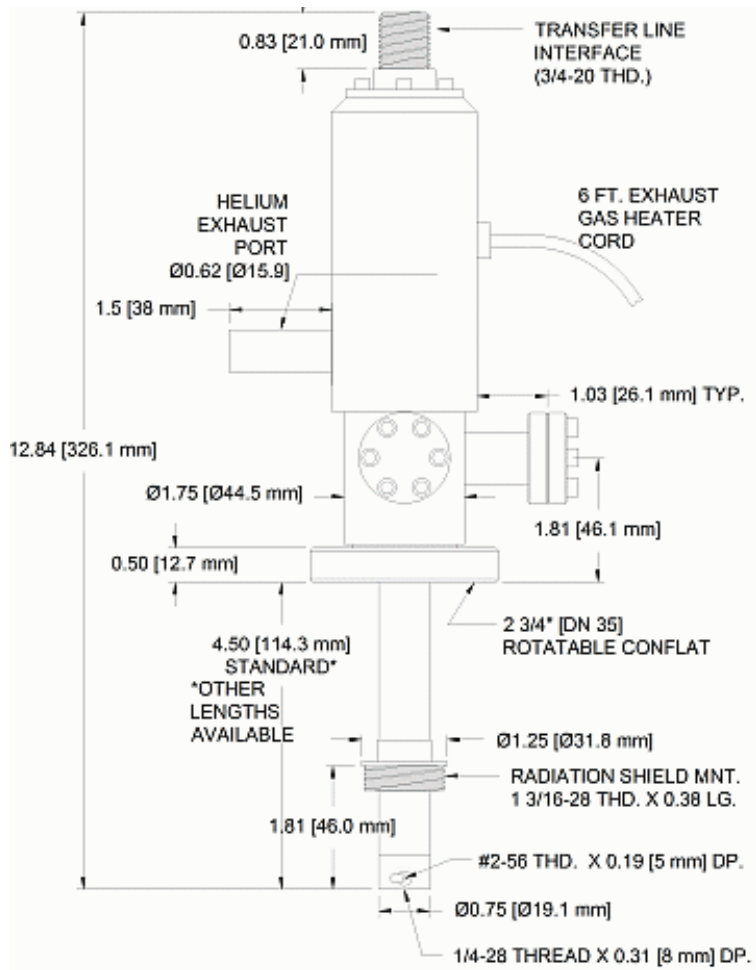


그림 2.11: ARS Cryo helitrans LT3B - drawings of ARS LT3B(from ARS home-page)

2.2.4 Continuous flow Cryostat

Sample 온도를 4K까지 내리기 위해 ARScryo 사의 LT-3B제품을 사용하였다. 이 제품은 Helitran이란 기술을 이용하는데 보통의 냉각기와 마찬가지로 cold tip 근처로 온 액체헬륨을 기화시켜 기화열을 이용할 뿐 아니라 열 교환기를 달아 기체 헬륨 또한 4.2K에서 cold tip의 온도까지 올라가며 냉각을 도와주도록 만든다. 이런 디자인으로 인해 냉각시에 열 효율이 극대화된다. 또한 transfer line에서도 기존과 달리 shield flow가 흐른다. 이 flow는 노즐을 이용해 압력차를 만들어 shield flow가 과냉각 되도록 만들어준다. 이 shield flow가 liquid helium을 보호하므로 liquid helium이 dewar에서 cryostat으로 옮겨지는 동안 기화하지 않아 온도가 안정되고 수Å이내의 진동을 보장한다. 이는 저온 STM을 실험하는데 아주 중요한 요소이다. 또한 냉각기 부근에서 flow를 조절할 수 있으므로 정밀한 조정이 가능해서 안정적인 온도조정이 가능하다.

2.2.5 Wobble stick modification

Wobble stick 은 샘플과 팁을 챔버 내에서 이동할 때 사용한다. 팁 교체시 정확한 위치를 결정하기 위해 limiter를 제작하였다. Wobble stick의 최대 깊이를 제한하는 역할을 한다. Limiter의 길이에 따라 wobble stick의 최대 들어가는 깊이가 달라지기 때문에 평소 보관시에도 이용되고 팁이나 샘플 교체를 할 때 wobble stick의 길이를 유지하고 필요 없는 이동을 방지하기 때문에 사고를 예방한다.

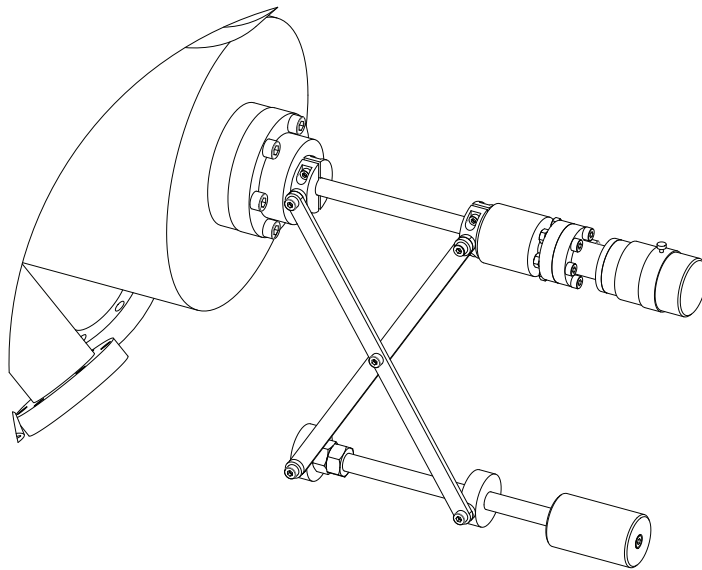


그림 2.12: Wobble stick modification - M10 thread를 이용해 wobble stick의 길이를 제한하는 구조로 이루어져 있다.

Chapter 3 실험

실험을 위해 bake-out으로 챔버를 5×10^{-11} torr 의 UHV 환경으로 만들어 주었다. Au(111) 샘플과 텅스텐 팁을 준비했다.

3.1 준비 과정

샘플은 이온 스퍼터링과 풀림으로 표면을 깨끗하게 정리하였다. 이온 스퍼터링은 원자를 이온화 시켜서 높은 전압으로 가속시켜 표면을 떼어내는 방법이다. 이 실험에서는 네온을 9.5×10^{-5} torr까지 채운 상태에서 500V로 가속시켜 스퍼터링 하였다. 풀림은 샘플을 높은 온도로 가열하여 스퍼터링으로 인한 울퉁불퉁한 표면을 균일하게 정리해주는 과정이다. 이 샘플에 +500V를 걸어주어 방출 전류가 8mA가 되도록 하여 30분간 풀림을 해 주었다. 이와 같은 과정을 30번 이상 반복하여 깨끗한 표면을 얻었다.

팁도 샘플과 마찬가지로 스퍼터링과 풀림을 통해 이물질이 없고 표족하게 만들어준다. 팁 스퍼터링의 경우 따로 ion-gun을 사용하지 않고 팁 자체에서 장방출(field emission)을 이용해서 팁 끝 부분만 뾰족해지도록 조절한다. 이 실험에서는 네온을 4.0×10^{-5} torr까지 채운 상태에서 470V에서 약 $5\mu A$ 의 스퍼터링 전류가 흐르는 것을 확인하였다. 풀림의 경우 팁에 +1.5kV를 건 채 팁 히터의 필라멘트를 가열해 방출 전류가 1.5mA가 되도록 한 뒤 1.5분간 풀림을 해 주었다.

3.2 결과

모든 결과는 액체질소 냉각을 통해 78K 근방에서 얻었다.

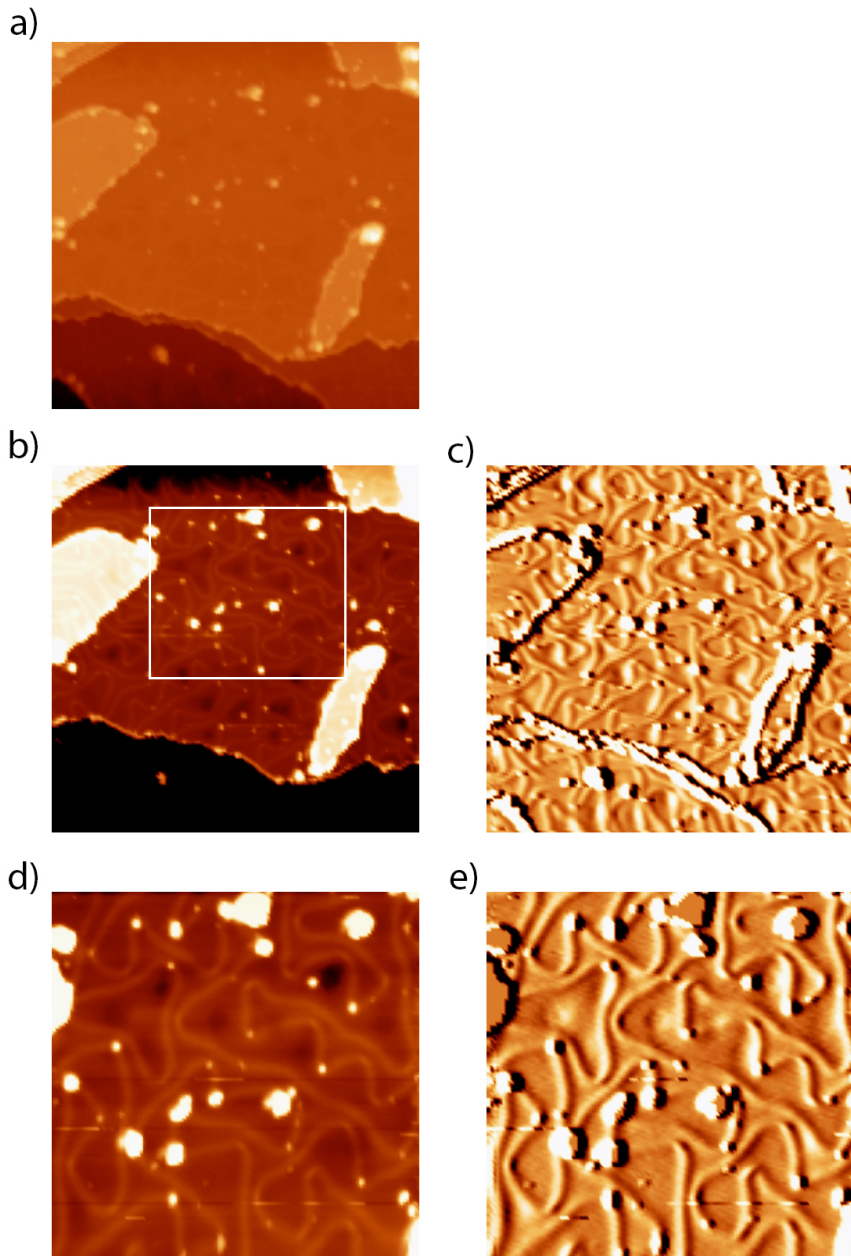


그림 3.1: Au(111) surface Herringbone structure - a) $11 \times 11 \text{ V}$ $I=100 \text{ pA}$ bias -2.0 V b) a와 동일 이미지. 프로세싱을 통해 헤링본 구조가 보임. 하얀색 박스는 d의 위치를 나타냄 c) a와 동일 이미지 미분을 통해 표면 구조를 더 잘 볼 수 있음. d) $6 \times 6 \text{ V}$ $I=100 \text{ pA}$ bias -2.0 V e) d와 동일 이미지 미분 결과

그림 3.1는 Au(111) sample 의 표면이다. Step 구조와 defect 들이 보인다. 높은 컨트라스트를 주면 herringbone 구조도 볼 수 있다.

그림 3.1 d)는 Figure 3.1 a)를 확대한 이미지이다. Herringbone의 휘어지는 부분에서 electron density가 높아서 불순물이 잘 달라붙어 있는 것을 볼 수 있다.

그림 3.1 c,e)는 herringbone structure 를 잘 보기 위해 높이 값을 x에 대해 미분한 결과이다.



그림 3.2: Low current topography - $5 \times 5 \text{V}$, $I=1\text{pA}$, $\text{bias}=2.0\text{V}$

그림 3.2는 tunneling current 1pA에서 얻은 topography이다. 굉장히 낮은 전류에서 측정을 하기 위해서는 piezo driving current의 leakage 가 1pA 보다 훨씬 적어야 가능하다. 팁과 feedback 조건이 정확하지 못해서 선명한 이미지는 얻지 못하였지만 Topography 상에서 step을 확인할 수 있었고 원하는 정도의 tip current insulation이 얻어진 것으로 보인다.

그림 3.3는 Au(111) 상의 atomic resolution 을 얻은 이미지로 tip 모양이 좋지 못하지만 원자의 육각형 구조를 확인할 수 있다.

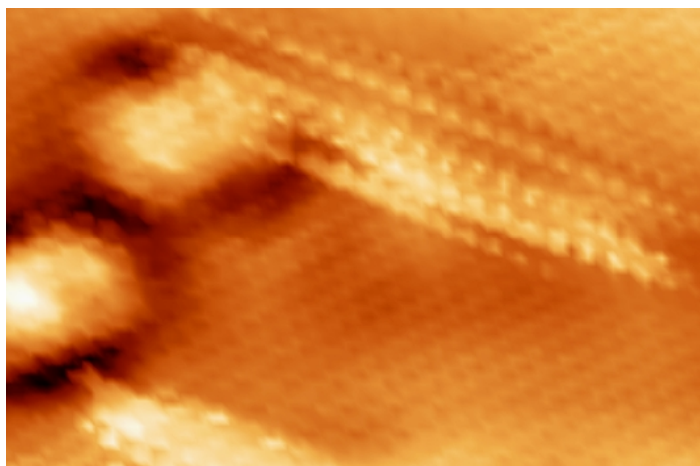


그림 3.3: Atomic resolution image - $52 \times 800 \text{ nV}$, $I=990 \text{ pA}$, bias= 10 mV

참고문헌

- [1] K. Besocke, “An easily operable scanning tunneling microscope,” *Surface Science*, vol. 181, no. 1-2, pp. 145–153, Mar. 1987. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0039602887901518>
- [2] G. Binnig and H. Rohrer, “Scanning tunneling microscopy,” *Surface Science*, vol. 126, no. 1-3, pp. 236–244, Mar. 1983. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0039602883907161>
- [3] K. A. Brown and W. Ho, “A threading tool for hard materials,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, no. 11, p. 5371, 1995. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/RSINAK/v66/i11/p5371/s1&Agg=doi>
- [4] C. Julian Chen, *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*. Oxford university press, 2007. [Online]. Available: <http://ukcatalogue.oup.com/product/9780199211500.do#.UQyBSb-EzqI>
- [5] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, “Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope,” *Nature*, vol. 344, no. 6266, pp. 524–526, Apr. 1990. [Online]. Available: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/344524a0>
- [6] J. Frohn, J. F. Wolf, K. Besocke, and M. Teske, “Coarse tip distance adjustment and positioner for a scanning tunneling microscope,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 60, no. 6, p. 1200, 1989. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/RSINAK/v60/i6/p1200/s1&Agg=doi>

- [7] P. K. Hansma, “Inelastic electron tunneling,” *Physics Reports*, vol. 30, no. 2, pp. 145–206, Apr. 1977. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0370157377900540>

Abstract

Construction of Besocke type STM for manipulation and IETS

Kang, Min

Departments of Physics

The Graduate School

Seoul National University

STM is a microscope using electron tunneling effects. Basic techniques of STM are topography, spectroscopy, and atomic manipulation. Topography is the most basic technique but for IETS and atomic manipulation, very stable low temperature STM is required. For these experiments, I designed and constructed Besocke type STM. This STM quickly stabilizes at low temperatures because low thermal mass and has 9 low temperature *in-situ* dosing ports.

I can't test IETS and atomic manipulation because setup did not finish completely but I obtained a very stable image of Au(111) surface at room temperature.

Keywords: Scanning Tunneling Spectroscopy, Inelastic Electron Tunneling Spectroscopy

Student number: 2011-20386

감사의 글

2년이란 짧은 시간 동안 연구실에서 참 많이 배웠습니다. 1년 전의 저를 떠올려 보면 이렇게도 모르는 게 많았었나 하는 생각이 듭니다. 연구실에서 생활하는 동안 모든 선배분이 후배의 어리석은 질문을 무시하지 않고 차근차근히 잘 알려주었던 것이 제게는 가장 큰 행복이었습니다. 그중에서도 특별히 많은 시간을 할애하여 가장 사소한 문제부터 다소 복잡한 내용까지도 친절하게 알려주고 STM2를 만드는데 거의 모든 일을 꼼꼼하게 도와준 함용돈 박사님 너무 감사합니다. 그리고 같이 일하는 게 항상 즐거운, 특히 이번 시스템을 위해 전자회로 수정부터 프로그래밍까지 마치 자기 일처럼 도와준 민준이형 감사합니다.

과목해 보이는 선배라서 장난치는걸 좋아하는 줄도 모르고 있었던 상준이형 실험실 볼트 정리부터 시작해서 미친한 후배를 잘 가르쳐주신 성준이형 디테일에 강하고 실험실의 웃음 포인트가 되는 범용이형 후배들을 차분하게 챙겨주고 생각이 깊은 성민이형 정확한 것을 좋아하는 민준이형 챙겨주기만 하지 않고 쓴소리도 해줘서 오히려 더 고마운 정훈이형 조용하고 차분한 지성이형 그리고 이런저런 이야기를 자주 했던 진화누나까지 모든 선배분 감사합니다.

운동을 좋아하는 선욱이형 어딘가 허당이라 실험실의 또 다른 웃음 포인트가 되는 명철이형 처음으로 어린 후배라 더 알려주고 잘 가르쳐 주고 싶었던 성우까지 후배들도 알게 모르게 많은 일을 도와주셔서 감사합니다.

끝으로 지금도 인생의 목표이자 본보기가 되는 어머니와 아버지께 모든 감사를 드립니다. 사랑합니다.